

529777

30 MAR 2005

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS  
NATIONAL BOARD OF PATENTS AND REGISTRATION

PCT/FI 03 / 00683

Helsinki 17.11.2003

ETUOIKEUSTODISTUS  
PRIORITY DOCUMENT



Hakija  
Applicant  
Noveltech Solutions Ltd  
Lieto

Patenttihakemus nro  
Patent application no  
20021734

Tekemispäivä  
Filing date  
30.09.2002

Kansainvälinen luokka  
International class  
G01N

Keksinnön nimitys  
Title of invention

"Fotoakustinen detektori"

Täten todistetaan, että oheiset asiakirjat ovat tarkkoja jäljennöksiä Patentti- ja rekisterihallitukselle alkuaan annetuista selityksestä, patenttivaatimuksista, tiivistelmästä ja piirustuksista.

This is to certify that the annexed documents are true copies of the description, claims, abstract and drawings originally filed with the Finnish Patent Office.

REC'D 28 NOV 2003

WIPO PCT

*Eija Solja*

Eija Solja  
Apulaistarkastaja

RULE 17.1(a) OR (b)

PRIORITY  
DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED  
BUT NOT IN COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

Maksu 50 EUR  
Fee 50 EUR

Maksu perustuu kauppa- ja teollisuusministeriön antamaan asetukseen 1027/2001 Patentti- ja rekisterihallituksen maksullisista suoritteista muutoksineen.

The fee is based on the Decree with amendments of the Ministry of Trade and Industry No. 1027/2001 concerning the chargeable services of the National Board of Patents and Registration of Finland.

Osoite: Arkadiankatu 6 A Puhelin: 09 6939 500 Telefax: 09 6939 5328  
P.O.Box 1160 Telephone: + 358 9 6939 500 Telefax: + 358 9 6939 5328  
FIN-00101 Helsinki, FINLAND

BEST AVAILABLE COPY

47

## Fotoakustinen detektori – Fotoakustisk detektor

5 Keksinnön kohteena on jäljempänä esitettyjen itsenäisten patenttivaatimusten johdanto-osissa esitetty fotoakustinen detektori ja mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi.

10 Kun infrapunasäteily tai valo yleensä osuu kaasutäytteiseen kammioon, jossa on tutkittavaa kaasua osapaineessa  $p_x$  ja kantokaasua osapaineessa  $p_N$  (tyypillisesti usein tyyppiä), kaasu  $p_x$  absorboi säteilyä. Absorbtio prosessin jälkeen energia muuttuu lämpöliikkeeksi tietyllä aikavakiolla  $\tau$  (esim.  $10^{-5}$  s). Tällöin koko kaasun lämpötila nousee  $\Delta T$  verran aikayksikössä. Lämpötilan nousu aikaansaa myös paineen nousun  $\Delta p$ .

15 Tyypillinen fotoakustinen detektori käsittää kammion, johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa, ikkunan moduloidun tai pulssitetun infrapunasäteilyn tai valon päästämiseksi kammioon, ja paineanturin, joka on järjestetty mittaamaan absorboituneen infrapunasäteilyn tai valon aikaansaamia painevaihteluita kammiossa. Paineanturi on tyypillisesti mikrofoni, ohut Mylar- tai metallikalvo. Fotoakustista detektoria  
20 voidaan käyttää mittaamaan tai havaitsemaan infrapunasäteilyä yleisesti, mutta detektorin eräs spesifinen ja tärkeä käyttö liittyy kaasujen tai kaasuseosten mittaamiseen ja havaitsemiseen liittyen esimerkiksi ilmanlaatuun tai -saasteisiin.

25 Mikrofoneissa kalvon (Mylar) liikettä mitataan tavallisesti kapasitiivisesti. Mylar – kalvo päällystetään metallilla ja asetetaan lähelle toista kiinteää metallikalvoa. Tällöin syntyy kondensaattori, jonka kapasitanssi on

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{h}, \quad (a)$$

jossa  $h$  on kalvojen välinen etäisyys lepotilassa,  $A$  kalvojen pinta-ala,  $\epsilon_r \epsilon_0$  levyjen välissä olevan kaasun dielektrisyysvakio ja  $\epsilon_0$  vastaava tyhjölle. Mittaamalla  $C$  saadaan  $h$ , joka antaa Mylar -kalvon liikkeen, koska

$$\Delta C = -\frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{3h^2} \Delta h, \quad (b)$$

jossa  $\Delta h$  on etäisyyden muutos keskellä ja  $\Delta h/3$  on keskimääräinen etäisyyden muutos. Edelleen

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta h}{h} \quad (c)$$

eli

$$|\Delta h_{\min}| \approx \frac{h}{C/\Delta C} = \frac{h}{S/N}, \quad (d)$$

jossa  $S/N$  on mittaavan elektroniikan signaali-kohinasuhde.

Tunnetun tekniikan mukaisia kapasiteettimittauksia rajoittaa levyjen välissä olevan kaasun virtaus, kun  $h$  muuttuu. Välin  $h$  pienetessä kaasun täytyy virrata levyjen välistä ulos ja takaisin  $h$ :n kasvaessa. Virtauksella on hitautta ja se vaatii energiaa. Tästä seuraa, että mitä suurempi on kalvon värähtelykulmataajuus  $\omega$  ja mitä pienempi  $h$  sitä enemmän virtaus pienentää kalvon liikkeen amplitudia. Täten  $h$ :ta ei voida pienentää rajattomasti, mikä kasvattaisi signaalia  $\Delta C$ . Tästä johtuen tunnetut kaupalliset mikrofonit toimivat fysikaalisten lakien rajoilla, eikä niiden herkkyyttä voida parantaa niiltä osin.

Nicolas Lederman et al. esittävät julkaisussaan [1] anturin fotoakustiseen detektoriin, jossa anturi on muodostettu ovimaisesta kalvosta, joka reagoi kaasun liikkeen fotoakustisen detektorin kammiossa, ja johon kalvoon on integroitu pietsosähköinen elementti, joka rekisteröi oven liikkeen. Julkaisussa esitetyn anturin ongelmana on se, että oven resonanssitaajuutta ei ole huomioitu. Todennäköisesti anturiin kiinnitetty pietsosähköinen elementti kasvattaa anturin resonanssitaajuutta ja näin ollen huonontaa anturin vastetta. Julkaisussa esitetty anturi on melko epätarkka eikä näin ollen sovellu suurta tarkkuutta vaativiin sovelluskohteisiin. Julkaisussa ei

myöskään ole esitetty fotoakustisen detektorin kammion ja anturin optimointia eli kammion koon suhdetta anturin kokoon.

5 Myös M. H. de Paula et al. ovat julkaisuissaan [2] ja [3] esittäneet vaihtoehdon perinteiselle kalvoratkaisulle. Julkaisuissa on esitetty fotoakustisen detektorin kammi-  
 on pienen reiän päälle kieli noin 0,1 millimetrin etäisyydelle reiästä. Julkaisussa  
 esitetyn mukaisesti kieli ei käsitä ns. karmia kielen ympärillä, jolloin kieli ulottuu  
 reiän reunojen ulkopuolelle eli kyseessä ei ole julkaisussa [1] esitetynkaltainen ovi.  
 Perusongelmana de Paula et al.:n julkaisuissa onkin näin ollen se, että fotoakustisen  
 10 detektorin kammiossa vaikuttava ja mitattava paine kohdistuu vain pieneen osaan  
 kielen kokonaispinta-alasta, mikä pienentää vastetta merkittävästi. Lisäksi vuoto  
 kielen alta on suuri suhteessa reiän kokoon, mikä edelleen alentaa kielen vastetta.  
 Julkaisussa [2] ja [3] on lisäksi esitetty optinen kulmamittaus kielen liikkeen mit-  
 taamiseksi. Julkaisuissa esitetyn kielen muoto on kuitenkin käytännössä epäedulli-  
 15 nen kulmamittaukselle. Näin ollen julkaisuissa [2] ja [3] esitetty ratkaisu ei ole riit-  
 tävän herkkä erittäin tarkkoihin mittauksiin ja suurta tarkkuutta vaativiin sovellu-  
 tuskohhteisiin.

Fotoakustisen detektoinnin ongelmana on lisäksi sen häiriintyminen ulkoisista ää-  
 20 nistä. Näin ollen, jos kammion sisällä oleva, mittalaitteen ulkopuolelta vuotanut  
 ääni on voimakkaampaa kuin systeemin oma kohina, detektorisysteemin herkkyy-  
 den (vasteen) parantaminen ei paranna tutkittavan kaasun määrittystä. Tyypillinen  
 menetelmä ulkoisista äänistä syntyvien häiriöiden vähentämiseksi on äänen eristä-  
 minen. Eristämisellä voidaan vaimentaa ulkoääniä kertoimella 10000 – 100000.

25 Eräs toinen tunnettu keino ulkoisista äänistä aiheutuvien häiriöiden vähentämiseksi  
 on käyttää kaksoisdetektiota, jolla saadaan osittain äänen häiriöitä pienennetyksi.  
 Tunnetuissa kaksoisdetektiojärjestelmissä tehdään identtinen mittaussysteemi varsi-  
 naisen mittausjärjestelmän kanssa, johon identtiseen systeemiin ei pääse valoa, ja  
 30 joka mittaa pelkästään ääntä kammion sisällä. Sen jälkeen tunnettujen järjestelmien

mukaisissa ratkaisuihin vahvistetaan suoraan varsinaisen mittaussignaalin ja identtisen mittaussysteemin antaman referenssisignaalin erotus. Kuvatus kaltaisten kaksoisdetektiojärjestelmien ongelmana on kuitenkin mm. se, että nämä järjestelmät toimivat vain erikoistilanteissa kapealla taajuuskaistalla. Ongelman syynä on mittaus-

5       ussysteemien antureiden välillä syntyvä vaihe-ero.

Esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin ja mittausjärjestelyn fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmän fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi tarkoituksena onkin poistaa tai ainakin vähentää edellä maini-

10       tusta tekniikan tasosta johtuvia ongelmia.

Lisäksi esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin ja mittausjärjestelyn fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmän fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi tarkoituksena on aikaansaada tarkka ja erittäin herkkä foto-

15       akustinen detektori.

Edelleen lisäksi esillä olevan keksinnön tarkoituksena on saada aikaan fotoakustinen detektori ja mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa, jossa ulkoisista äänistä syntyvien häiriötekijöiden vaikutusta mittaustulokseen on vähennetty.

20

Mm. edellä mainittujen tarkoitusten toteuttamiseksi keksinnön mukaiselle fotoakustiselle detektorille ja mittausjärjestelylle fotoakustisessa detektorissa sekä menetelmälle fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi on pääasiassa tunnusomaista se, mikä on esitetty oheisten itsenäisten patenttivaatimusten tunnus-

25       merkkiosissa.

Tällöin tyypillisessä esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet anturin liikkeen mittaamiseksi käsittävät ainakin yhden tai useamman valolähteen anturin tai sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman monidetektorin detektorin anturista heijastuneen valon vastaanottamiseksi ja anturin liikkeen mit-

30

taamiseksi optisena kulma- ja/tai translaatiomittauksena. Monidetektori detektorilla tarkoitetaan tässä yhteydessä detektoria, joka käsittää kaksi, kolme tai useampia detektoria eli nimettynä vastaavasti kaksoisdetektoreita, kolmoisdetektoreita jne. Toisin sanoen detektoreita, joista saadaan useita erillisiä mittaussignaaleita eli kaksoisdetektorista kaksi mittaussignaalia ja kolmoisdetektorista kolme mittaussignaalia jne. Monidetektori detektorit voidaan toteuttaa liittämällä yhteen useita erillisiä detektoreita tai valmistamalla esimerkiksi samaan runkoon kolme detektoria. Myös esimerkiksi rividetektoria, kuten CCD-rividetektori, voidaan käyttää tässä yhteydessä tarkoitettuna monidetektori detektorina. CCD-rividetektoria voidaan käyttää korvaamaan sekä kaksoisdetektori että kolmoisdetektori.

Näin aikaan saadaan anturin toimintaa käytännössä lähes häiritsemätön mittausmenetelmä ja -järjestelmä. Mittauksen häiritsemättömyydellä tarkoitetaan sitä, että mittausmenetelmä ei käytännössä häiritse ja/tai vaimenna anturin liikettä eli optisten hiukkasten vaikutus oven liikkeeseen on käytännön mittaussovellutuksissa katsottava tässä yhteydessä merkityksettömäksi. Edullisesti käytettävä valonlähde on laser tai ohut hehkulanka. Hehkulangan etuna on se, että sen avulla saadaan aikaan laaja lineaarisuusalue.

Kaksoisdetektorin etuna on se, että anturin liikkeen mittaus voidaan suorittaa sekä kulmamittauksena että translaatiomittauksena. Kulmamittauksessa on edullista, että valolähteen lähettämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain kaksoisdetektorin pinnalle. Translaatiomittauksessa on tyypillisesti edullista, että valonlähteen lähettämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain oven tai kalvon pinnalle sekä kaksoisdetektorille.

Eräässä edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet anturin liikkeen mittaamiseksi käsittävät ainakin valolähteenä toimivan laserin, ainakin yhden optisen linssin lasersäteen kohdistamiseksi, referenssipeilin, säteenjakajan lasersäteiden jakamiseksi anturille ja referenssipeilille ja detektorina

toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien lasersäteiden vastaanottamiseksi. Erittäin edullisesti referenssipeili on järjestetty siten, että kolmois- tai rividetektorille syntyy  $\frac{3}{4}$  osaa interferenssiuovasta.

- 5 Eräessä erittäin edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet anturin liikkeen mittaamiseksi käsittävät lisäksi kiinteän tasopeilin ja kiinteän päätypeilin, jotka on järjestetty siten, että laservalo kulkee päätypeiliin ja takaisin heijastuen edestakaisin anturin ja tasopeilin välillä. Erittäin edullisesti tasopeili ja/tai päätypeili on järjestetty siten, että säteenjakajalta anturin kautta  
10 päätypeilille kulkevaksi järjestetty lasersäde palaa samaa optista tietä takaisin päätypeililtä säteenjakajalle.

- Eräs erittäin edullinen esillä olevan keksinnön mukainen fotoakustinen detektori käsittää lisäksi kolmannen kammion, joka on suljettu ja kooltaan identtinen ensimmäisen kammion kanssa, ja jossa on ensimmäisen kammion käsittämän aukon kanssa identtinen aukko, joka yhdistää kolmannen kammion toiseen kammioon, ja joka kolmannen kammion aukko on suljettu vastaavalla anturilla kuin ensimmäisen kammion aukko, ja jonka anturin liikettä mitataan vastaavalla tavalla kuin ensimmäisen kammion aukon sulkevan aukon liikettä, sekä välineet ensimmäisen kammi-  
15 on aukkoon järjestetystä anturista mitatun varsinaisen mittaussignaalin ja kolmannen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun referenssisignaalin amplitudi-  
20 en laskemiseksi ja niiden erotuksen aikaansaamiseksi.

- Tyypillinen esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi käsittää ainakin valolähteenä toimivan laserin tai hehkulangan, ainakin yhden optisen linssin valonsäteen kohdistamiseksi, referenssipeilin, säteenjakajan valonsäteen jakamiseksi anturille ja referenssipeilille, kiinteän tasopeilin ja kiinteän päätypeilin, jotka on järjes-  
25 tetty siten, että valonsäde kulkee päätypeiliin ja takaisin heijastuen edestakaisin an-

turin ja tasopeilin välillä, ja detektorina toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien valonsäteiden vastaanottamiseksi.

Tyypillisessä esillä olevan keksinnön mukaisessa menetelmässä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi mittaus suoritetaan optisena mittauksena, jolloin anturia tai sen osaa valaistetaan ja anturista heijastunutta valoa mitataan monidetektorilla detektorilla. Tällöin anturin liike mitataan kulmamittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain kaksois- tai rividetektorille ja mittaamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksois- tai rividetektorilla, tai anturin liike mitataan translaatiomittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain anturin pinnalle ja kaksois- tai rividetektorille ja mittaamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksois- tai rividetektorilla, tai anturin liike mitataan translaatiomittauksena käyttäen interferometriä, ja mittaamalla anturista heijastuneen valonsäteen interferenssijuo-

van siirtymistä kolmois- tai rividetektorilla. Valonsäteen kohdistamisella likimain anturin pinnalle ja/tai kaksois- tai rividetektorin pinnalle tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että valonsäteen fokus on anturin ja/tai kaksois- tai rividetektorin pinnalla sillä tarkkuudella kuin se teknisesti on mahdollista.

Keksintöä selostetaan seuraavassa lähemmin viittaamalla oheiseen piirustukseen, jossa

20

Kuvio 1 esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin rakennetta,

Kuvio 2 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä oven kulmamuutoksen perusteella,

25

Kuvio 3 esittää kaaviomaisesti valotehoa kaksoisdetektorilla kuvion 2 mukaisessa mittausjärjestelyssä,

Kuvio 4 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä oven translaatiomittauksen perusteella,



- Kuvio 5 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä perustuen Michelsonin interferometrin käyttöön,
- 5 Kuvio 6 esittää kaaviomaisesti kuvion 5 mukaisessa mittausjärjestelyssä kolmoisdetektorille syntyvää interferenssijuovaa,
- Kuvio 7 esittää kaaviomaisesti tangentin epäjatkuvuuskohtia,
- Kuvio 8 esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturia yläviistosta
- 10 Kuvio 9a esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturia edestä,
- Kuvio 9b esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturin poikkileikkausta,
- Kuvio 10a esittää kaaviomaisesti resonanssikulmataajuuden  $\omega_0$  vaikutusta amplitudiin  $A_x(\omega)$ ,
- 15 Kuvio 10b esittää kaaviomaisesti oven resonanssin mallinnusta,
- Kuvio 11 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin oven erästä edullista muotoa,
- Kuviot 12a ja 12b esittävät kaaviomaisesti eräitä vaihtoehtoisia esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin oven muotoja, ja
- 20 Kuvio 13 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä moninkertaiseen heijastukseen perustuvan optisen kertojan avulla.
- 25 Kuviossa 1 on kaaviomaisesti esitetty esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin eräs suoritusmuoto. Kuviossa esitetyn mukaisesti fotoakustinen detektori käsittää kaasutäytteiset kammiot V ja  $V_0$ , joissa on tai joihin voidaan johtaa tutkittavaa kaasua osapaineessa  $p_x$  ja kantokaasua osapaineessa  $p_N$  (tyypillisesti usein typpeä). Ensimmäinen kammio  $V_0$  on muodostettu rengasmaisesta runko-osasta 1, jonka ensimmäiseen avoimeen päähän on järjestetty kammion ensimmäisen pään sulkeva ikkuna 2, jonka läpi infrapunasäteily tai valo yleensä voidaan joh-
- 30

taa kammioon. Ikkuna 2 on edullisesti valmistettu hyvin infrapunasäteilyä ja/tai valoa läpäiseväksi ja sen paksuun on edullisesti noin 3 – 6 mm. Kammion  $V_0$  mitoitus ja sen optimointi on tarkemmin esitetty alla. Kammion  $V_0$  toiseen avoimeen päähän on järjestetty kammion toisen pään ainakin osittain sulkeva, paineanturina toimiva piiovi 3, jonka rakenne on tarkemmin esitetty kuvioissa 8 ja 9. Piioven 3 tilalla voidaan käyttää myös mikrofonia, ohutta Mylar- tai metallikalvoa. Fotoakustinen detektoriksi käsittää ensimmäisen kammion  $V_0$  toisen pään jatkeeksi järjestetyn toisen kammion V, joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus V. Mittaustilaan on järjestetty piioven liikkeen mittausrakenteet. Mittaustilan toinen pää on kuviossa 1 esitetyn mukaisesti suljettu referenssijärjestelmällä, joka käsittää toisesta päästä suljetun referenssikammion  $V_0$ , joka on kooltaan identtinen ensimmäisen kammion  $V_0$  kanssa. Referenssikammion  $V_0$  ensimmäinen pää on suljettu vastaavalla piovella kuin ensimmäinen kammiokin.

15 Fotoakustisen anturin tarkkuutta voidaan parantaa korvaamalla tunnetun tekniikan mukainen kapasitiivinen oven tai kalvon liikkeen mittaaminen esillä olevan keksinnön mukaisella optisella mittausrakenteella. Optinen mittaaminen häiritsee erittäin vähän oven tai kalvon liikettä. Esillä olevan keksinnön mukaisesti liikettä voidaan mitata joko oven tai kalvon kulman tai oven tai kalvon jonkin pisteen translaatioliikkeen avulla.

20 Kuviossa 2 on esitetty kulmamittaukseen perustuva mittausrakenteet, jossa käytetään laserilla 10 toteutettua optista viisaria kaksoisdetektorin 11 ollessa detektorina. Mittausrakenteet käsittää anturina toimivan oven 3 lisäksi valolähteenä toimivan laserin 10, optisen linssin 12 valonsäteen kohdistamiseksi ja kaksoisdetektorin 11 ovesta 3 heijastuneen valonsäteen vastaanottamiseksi ja mittaamiseksi. Kaksoisdetektoriksi käsittää siis ensimmäisen detektorin d1 ja toisen detektorin d2. Valonsäteen fokus 13 on kaksoisdetektorilla. Kuviossa 3 on esitetty mittausrakenteen valoteho kaksoisdetektorilla, jossa jokaisessa y:n pisteessä on valon intensiteetti integroitu y:tä vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Kuvioissa 4 ja 5 esitetyn kulmamittauksen kulman muutos  $\Delta\alpha$  muunnetaan translaatioliikkeeksi  $\Delta y = a2\Delta\alpha$ , joka mitataan kaksoisdetektorilla  $d_1d_2$ . Kulma  $\Delta\alpha$  on keskimääräinen kulmamuutos lasersäteen valaisemalla alueella ovesa. Yleisesti  $\Delta\alpha$  riippuu mittaustaikasta eli  $l$ :stä

$$\tan \Delta\alpha = \frac{FL^2}{6EI} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] = \frac{8EI\Delta x L^2}{6L^3 EI} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] = \frac{4\Delta x}{3L} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right], \quad (27)$$

eli

$$\Delta y \approx 2a \frac{4\Delta x}{3L} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right]. \quad (28)$$

Pienin liike, joka voidaan mitata kaksoisdetektorilla on

$$\Delta y_{\min} = \frac{\sigma}{2(S/N)}, \quad (29)$$

jossa  $\sigma$  on laserfokuksen puoliarvoveveys. Minimissään  $\sigma$  on diffraktion rajoittama eli

$$\sigma \approx \frac{\lambda}{D}(a+b). \quad (30)$$

Tällöin havaittava minimiliike oven päässä on

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3L\Delta y_{\min}}{8a \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right]} = \frac{3L\lambda(a+b)}{2D(S/N)8a \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right]} = \frac{3L\lambda(a+b)}{16aD \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] (S/N)}. \quad (31)$$

Valaistun alueen leveys ovesa on  $aD / [(a+b) \cos\beta]$ , mikä antaa lopullisen rajoituksen. Jos  $b \approx 0$  ja  $l \approx L$ , niin edellisestä yhtälöstä saadaan

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3L\lambda}{16D(S/N)}. \quad (32)$$

Käytännössä  $D \leq L$ , eli

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3\lambda}{16(S/N)}, \quad (33)$$

jossa  $S$  on laserin teho  $I_0$  ja  $N$  valon ja elektroniikan summakohina.

Signaalin (valotehon vaihtelun) amplitudi

$$A_v = \Delta P_{d_1} - \Delta P_{d_2} = 2\Delta y I_{\max}, \quad (34)$$

jossa  $\Delta P_{d_1}$  ja  $\Delta P_{d_2}$  ovat valotehon muutokset detektoreilla  $d_1$  ja  $d_2$  sekä  $I_{\max}$  on maksimivaloteho /  $\Delta y$ . Nyt yhtälön (28) avulla

$$A_v = a \frac{16A_x I_{\max}}{3L} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right] \approx \frac{16aA_x}{3L} \frac{P_{d_1} + P_{d_2}}{\sigma} \left[ 1 - \left( \frac{L-l}{L} \right)^3 \right], \quad (35)$$

jossa  $P_{d_1} + P_{d_2} = I_0$  on kaksoisdetektorille osuvan laserin valoteho.

Siis optisen viisarin valosignaalin amplitudi on

$$A_v = \frac{16aDI_0A_x}{3L\lambda(a+b)} = \frac{16I_0A_x}{3\lambda}, \quad (36)$$

jossa  $A_x$  on oven liikkeen  $x$  amplitudi, jonka on oltava  $< \lambda$ .

Esillä olevan keksinnön mukaisen optisen viisarin etuna on mm. sen yksinkertainen rakenne, se ei häiritse oven liikettä ja kaksoisdetektori vaimentaa laserin valon fotonikohinaa. Edullisesti laserin valoläikän koko ovella on suuri,  $D \approx L$ , jotta  $\sigma$  olisi pieni. Esillä olevan keksinnön mukaista optista viisaria voidaan käyttää myöskin kalvon liikkeen mittaamiseen, jolloin optimaalinen mittauspaiikka on

$$r/\sqrt{3}.$$

Oven liike voidaan esillä olevan keksinnön mukaisesti mitata siis myös translaatiomittauksena. Kuviossa 4 on esitetty esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely, joka ei ole kulmamittaus ja jolla oven translaatioliike  $x$  voidaan mitata. Mittausjärjestely käsittää oven lisäksi valonlähteenä toimivan laserin 10, kaksoisdetek-

torin 11, ensimmäisen optisen 12 linssin valonsäteen fokuksen 13 kohdistamiseksi lepotilassa eli liikkumattomassa tilassa olevan oven 3 pinnalle ja toisen optisen lins-  
sin 12 ovesta 3 heijastuvan valonsäteen kohdistamiseksi kaksoisdetektorille. Valon-  
lähde, optiset linssit ja kaksoisdetektori on järjestetty siten, että kun ovi on lepoti-  
5 lassa on ovelle tulevan ja siitä heijastuvan valonsäteen välinen kulma 90 astetta. Mittauksen etuna on mm. se, että lasersäde on fokuksessa oven pinnalla ja oven op-  
tinen laatu voi olla huono. Minimiliike, joka mittausjärjestelyllä voidaan havaita on

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{\sqrt{2}a\lambda}{4D(S/N)}, \quad (37)$$

jos ovesta on peilipinta.

Minimiliike on samaa suuruusluokkaa kuin kulmamittauksessa eli  $\Delta x_{\min} = \lambda / (S/N)$ ,  
jos  $D = \sqrt{2}a/4$ . Myös translaatiomittaus soveltuu myös kalvon liikkeen mittaukseen.

Oven tai kalvon liikettä voidaan mitata esillä olevan keksinnön erään edullisen so-  
vellutusmuodon mukaisesti optisesti myös interferometriä käyttämällä. Kuviossa 5  
on esitetty eräs esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely oven tai kalvon  
liikkeen mittaamiseksi ns. Michelsonin interferometrillä. Kuviossa esitetyn mukai-  
20 sestä järjestely käsittää itse oven lisäksi valonlähteenä toimivan laserin 10, optisen  
linssin 12 lasersäteen kohdistamiseksi, säteenjakajan 15 eli puoliläpäisevän peilin  
lasersäteiden jakamiseksi ovelle ja referenssipeilille 16, referenssipeilin 16 ja kol-  
moisdetektorin 17 säteenjakajalta 15 tulevien lasersäteiden vastaanottamiseksi. Ku-  
viossa esitetyn mukaisesti lasersäde on likimain fokuksessa sekä ovesta että refe-  
25 renssipeilissä. Referenssipeiliä 16 säädetään siten, että kolmen anturin d1, d2 ja d3  
muodostamalle kolmoisdetektorille 17 syntyy  $\frac{3}{4}$  paperitasoa vastaan kohtisuorasta  
interferenssijuovasta. Kun  $x$  muuttuu oven liikkua, interferenssijuova liikkuu  
sivuttaan detektorien yli, kuten kuviossa 6 on esitetty. Juova liikkuu yhden juovan  
välillä, kun  $x$  muuttuu  $\lambda / 2$ :n verran. Juovan intensiteettijakauma on

$$I(z) = \frac{1}{2} A \left[ 1 + \cos \left( 2\pi \frac{z}{D} \right) \right] \quad (38)$$

Jos interferenssijuova liikahtaa  $\varepsilon$ :n verran, saadaan antureiden  $d_1$ ,  $d_2$  ja  $d_3$  signaalit  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$  seuraavasti:

$$I_1(\varepsilon) = \int_{-\frac{D}{4}+\varepsilon}^{\frac{D}{4}+\varepsilon} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(2\pi \frac{z}{D}\right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[ -\cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) + \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \right], \quad (39)$$

$$I_2(\varepsilon) = \int_{\frac{D}{4}+\varepsilon}^{\varepsilon} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(2\pi \frac{z}{D}\right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[ \cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) + \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \right] \quad \text{ja (40)}$$

$$I_3(\varepsilon) = \int_{\varepsilon}^{\frac{D}{4}+\varepsilon} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(2\pi \frac{z}{D}\right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[ \cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) - \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \right]. \quad (41)$$

Tällöin

$$\begin{cases} I_2(\varepsilon) - I_1(\varepsilon) = \frac{AD}{2\pi} \cos\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \\ I_2(\varepsilon) - I_3(\varepsilon) = \frac{AD}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \end{cases} \quad (42)$$

eli

$$\frac{2\pi\varepsilon}{D} = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}. \quad (43)$$

Koska  $\varepsilon = \Delta z = 2D\Delta x/\lambda$ , niin

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}. \quad (44)$$

Koska signaalit  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$  ovat  $90^\circ$ :n vaiheessa keskenään ja siten myös signaalit  $I_2 - I_1$  ja  $I_2 - I_3$  ovat  $90^\circ$ :n vaiheessa toistensa suhteen, niiden avulla voidaan selvittää kuviossa 7 esitettyjen tangenttifunktion epäjatkuvuuskohtien yli. Eli yhtälössä

$$\Delta x = \left( k + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}$$

saadaan mitatuksi kokonaisluvun  $k$  muutokset  $\pm 1$  tangentin epäjatkuvuuskohdissa  
 $\phi = (n + 1/2)\pi$ .

Pienin havaittava liike on

$$\Delta x_{\min} = \frac{\sigma}{2(S/N)} = \frac{\lambda}{8(S/N)}, \quad (45)$$

jossa  $S = I_0/2$ .

Jos oven liike on pieni  $< \lambda / 4$ , voidaan edellä kuvatun mittausjärjestelyn kolmoisde-  
 10 tektorin tilalla käyttää kaksoisdetektoria kuten optisessa viisarissa. Tällöin anturien  
 yhteinen leveys on yhden juovan leveys ja

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = \frac{AD}{2} = \frac{I_0}{2} \\ I_1 - I_2 = \frac{AD}{\pi} \sin\left(2\pi \frac{\varepsilon}{D}\right) \end{cases} \quad (46)$$

15

Koska  $\varepsilon = \Delta z = 2D\Delta x/\lambda$  on

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right\} \approx \frac{\lambda}{8} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{\lambda}{4I_0} (I_1 - I_2), \quad (47)$$

20

jossa  $I_0$  on laserin valoteho. Tällöin valosignaalin amplitudi on

$$A_I = I_1 - I_2 \approx 4 \frac{I_0 A_x}{\lambda}, \quad (48)$$

jossa  $A_x$  on oven liikkeen  $x$  amplitudi.

25

Interferometrisen kolmoisdetektorin käyttöön perustuvan mittausjärjestelyn perus-  
 ideana siis on, että pitää saada aikaiseksi kolme signaalia, jotka ovat  $90^\circ$ :n vaihe-  
 erossa keskenään. Tällöin käyttäen näitä kolmea signaalia saadaan poistetuksi valo-  
 lähteen mahdollisesta välkkymisestä syntyvä virhetekijä, dc-komponentti. Näin ol-  
 len interferometrinen mittaus voidaan toteuttaa myös siten että interferometri sääde-  
 30 tään niin, että juovien väli on detektoreilla periaatteessa ääretön, jolloin mittausta ei

suoriteta juovien liikkeen perusteella. Tällöin lisäksi interferometri säädetään siten, että valonlähde järjestetään säteenjakajaan nähden 45 asteen kulmasta poikkeavaan kulmaan, jolloin sekä ovesta (tai kalvosta) että referenssipeilistä heijastuva valonsäde, jonka fokus on ovella (tai kalvolla) ja referenssipeilillä, ei palaa täsmälleen samaa reittiä takaisin vaan menevän valonsäteen ja palaavan valonsäteen välillä on pieni kulma. Tällöin kolmoisdetektori palaavien valonsäteiden mittaamiseksi voidaan toteuttaa siten, että kaksi detektoria, jotka muodostavat kaksoisdetektorin, järjestetään mittaamaan ovelta (tai kalvolta) palaavaa ja säteenjakajalta heijastuvaa valonsädettä sekä referenssipeililtä palaavaa ja säteenjakajan läpäisevää valonsädettä. Kolmas detektori järjestetään mittaamaan ovelta (tai kalvolta) palaavaa ja säteenjakajan läpäisevää valonsädettä sekä referenssipeililtä ja säteenjakajasta heijastuvaa valonsädettä (edullisesti kolmas detektori järjestetään valonlähteen läheisyyteen). Lisäksi kun referenssipeililtä palaavan valonsäteen kulkureitille järjestetään kaksi välinettä, kuten esimerkiksi kaksi lasilevyä, joista ainakin toisen asentoa voidaan säätää, voidaan mainittujen välineiden asentoa säätämällä aikaansaada  $90^\circ$ :n vaihe-ero kaksoisdetektorin muodostavien detektorien mittaussignaalien välille. Näin aikaan saadaan kolme signaalia  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$ , jotka ovat  $90^\circ$ :n vaihe-erossa keskenään.

Esillä olevan keksinnön mukaisen interferometrisen mittauksen etuja ovat mm: Yhtälön (44) mukaisesti vaste on erittäin lineaarinen jopa silloin kun oven tai kalvon liike on useita aallonpituuksia. Absoluuttinen tarkkuus on hyvä, koska interferenssisignaalin muoto on tarkasti  $1/2(1+\cos(2\pi z/D))$  -muotoinen. Lisäksi laser voidaan fokusoida oven mittauspisteeseen lähes pistemäisesti eikä diffraktio vaikuta tulokseen. Myöskään laserin intensiteetin  $I_0$  vaihtelu ei vaikuta mittaustuloksen arvoon, koska yhtälössä (44) interferenssijuovan maksimi-intensiteetin  $A$  arvo supistuu pois.

Kuten edellä on todettu, voidaan esillä olevan keksinnön mukaisessa mittausjärjestelyssä käyttää ensimmäisessä kammiossa tapahtuvien painevaihteluiden havaitsemiseen sekä sinänsä tunnettua kalvoa, joka voi olla jännitetty tai jännittämätön, tai esillä olevan keksinnön erittäin edullisen suoritusmuodon mukaisesti esimerkiksi



piistä valmistettua ovea, jonka käyttö edelleen parantaa fotoakustisen detektorin mittaustarkkuutta ja -herkkyyttä. Lisäksi alla esitetään menetelmä oven tai kalvon optimoimiseksi.

- 5 Kuviossa 8 ja 9 on esitetty kaaviomaisesti ja esimerkinomaisesti eräs edullinen esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa käytettävä paineanturina toimiva piistä valmistettu ovi. Paineanturi käsittää levymäisen, oven karmina toimivan reunaosan ja levymäisestä osasta uralla erotetun oven.  $L$  on oven leveys,  $h$  korkeus,  $d$  paksuus ja  $\Delta$  raon leveys.

10

Pienillä ikkunan läpi kammioon johdettavilla valolähteen IR-tehoilla tasapainotilassa, kun  $W(t) = W_{av} + W_0 \cos(2\pi ft)$ , on

$$\left( \frac{dT}{dt} \right)_{\tau_0} = \frac{a_x p_x 2l (\cos \alpha)^{-1} W_0 \cos(2\pi ft)}{\sum_i c_v^i m_i} = \frac{a_x p_x 2l (\cos \alpha)^{-1} W_0 \cos(2\pi ft)}{V_0 \sum_i c_v^i \rho_i}, \quad (1)$$

15

jossa  $a_x$  on osapaineessa  $p_x$  olevan kaasun absorptiokerroin,  $l$  kammion pituus,  $\alpha$  IR-säteen ja kammion keskiakselin välinen kulma ja  $W(t)$  nettovaloteho, joka menee kammioon. Eli  $W(t)$  on valon intensiteetti  $\times \pi R^2$ , jossa  $R$  on kammion säde.  $m_i$  on kaasukomponentin massa,  $c_v^i$  on vastaavan kaasun ominaislämpökapasiteetti,  $\rho_i$  on kaasun  $i$  tiheys ja  $V_0$  on pienemmän kammion tilavuus. Esimerkiksi

20

$$\sum_i c_v^i m_i = c_v^x m_x + c_v^N m_N = V_0 (c_v^x \rho_x + c_v^N \rho_N).$$

Yhtälössä (1) on oletettu, että  $\tau \ll f^{-1} \ll \tau_0$ , jossa  $\tau_0$  on aikavakio lämmönjohtumiselle ulos kammioista ja  $\tau$  aikavakio absorptioenergian muuttumiselle lämmöksi. Edelleen

25

$$\Delta T = T(t) - T_0 = \int \left( \frac{dT}{dt} \right)_{\tau_0} dt = \frac{a_x p_x 2l (\cos \alpha)^{-1} W_0 \sin(2\pi ft)}{2\pi f V_0 \sum_i c_v^i \rho_i}. \quad (2)$$

Ideaalikaasun tilanyhtälöstä saadaan

30

$$\frac{dp}{p_0} + \frac{dV}{V_0} = \frac{dT}{T_0}. \quad (3)$$

Paineanturissa:

$$\begin{aligned} dV &\approx \frac{1}{2} xA \\ Adp &= kx = F, \end{aligned} \quad (4)$$

5

jossa  $A$  on paineanturin pinta-ala,  $k$  on jousivakio ja  $x$  on liike. Yhtälöistä (3) ja (4) saadaan

$$x \approx \frac{\frac{\Delta T/T_0}{k} + \frac{A}{2V_0}}{\frac{A}{Ap_0} + \frac{A}{2V_0}} \quad (\omega = 0). \quad (5)$$

10

Koska yhtälössä (2) esitetty  $\Delta T$  on moduloitu kulmataajuudella  $\omega$ , täytyy tarkastella oven (tai kalvon) liikeyhtälöä eli

$$m\ddot{x} - 2\beta m\dot{x} + \underbrace{m\omega_0^2}_k x = F_0 e^{i\omega x}, \quad (6)$$

15

jossa  $F_0 e^{i\omega x}$  on pakko voima,  $\beta$  vaimennusvakio,  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  resonanssikulmataajuus ja  $x$  liike joko oven päästä tai oven tai kalvon keskeltä. Yhtälön (6) ratkaisu

$$x = \frac{(F_0/m)e^{i\omega x}}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\omega\beta}, \quad (7)$$

20

josta saadaan amplitudi

$$\sqrt{x^* x} = A_x(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}. \quad (8)$$

Yhtälöistä (3) ja (4) saadaan amplitudeille

25

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{1}{2} A_x(\omega) \frac{A}{V_0}$$

ja täten

$$A_x(\omega) = \frac{A \Delta p / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} = \frac{Ap_0 \left( \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{A_x(\omega)A}{2V_0} \right)}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

30

josta

$$A_x(\omega) = \frac{Ap_0 \frac{\Delta T}{T_0}}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2} + \frac{p_0 A^2}{2V_0}}. \quad (9)$$

- 5 Kuviossa 10a on kaaviomaisesti esitetty resonanssikulmataajuuden  $\omega_0$  vaikutus oven tai kalvon amplitudiin  $A_x(\omega)$ .

Jos  $\omega = 0$ , niin yhtälö (9) antaa yhtälön (5) eli  $A_x(0) = x$ , koska  $m\omega_0^2 = k$ .

- 10 Oven tai kalvon resonanssi on edullista mallintaa niin, ettei resonanssin tuomaa amplitudin kasvua  $\omega_0$ :n ympärillä huomioida (katso kuvio 10b). Siis jos  $\omega < \omega_0$ , on

$$A_x(\omega) \approx \frac{Ap_0 \Delta T/T_0}{m\omega_0^2 + \frac{p_0 A^2}{2V_0}} = \frac{p_0 \Delta T/T_0}{\frac{m\omega_0^2}{A} + \frac{p_0 A}{2V_0}} = \frac{p_0 \Delta T/T_0}{\rho d\omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}}, \quad (10)$$

15

ja jos  $\omega > \omega_0$ , on

$$A_x(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T/T_0}{\rho d\omega^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}}, \quad (11)$$

- joissa  $\rho$  on oven tai kalvon tiheys ja  $d$  paksuus. Jos resonanssia ei hyödynnetä, ovea tai kalvoa kannattaa käyttää resonanssikulmataajuuden  $\omega_0$  alapuolella eli yhtälöä (10), josta nähdään, että amplitudin  $A_x(\omega)$  optimointi, eli maksimointi, tulee tehdä  $\omega_0$ :n  $d$ :n,  $V_0$ :n ja  $A$ :n avulla. Mitä pienempiä  $\omega_0$  ja  $A$  ovat, sitä suurempi  $A_x(\omega)$  on.

Amplitudi saavuttaa maksimin, kun  $\rho d\omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}$  saavuttaa minimin. Näin tapahtuu,

kun

25

$$\rho d\omega_0^2 \approx \frac{p_0 A}{2V_0} \quad (12)$$

ja

$$A_x^{opt}(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T/T_0}{2\rho d\omega_0^2} = \frac{p_0 \Delta T/T_0}{2 \frac{p_0 A}{2V_0}}. \quad (13)$$

Yhtälöiden (1) ja (2) avulla saadaan yhtälöstä (13)

$$A_x^{opt}(\omega) \approx \frac{p_0 \alpha_x p_x I (\cos \alpha)^{-1} W_0}{T_0 \omega V_0 \sum_i c_v^i \rho_i \rho d \omega_0^2}, \quad (14)$$

5 jossa  $\omega \leq \omega_0$ . Yhtälöstä nähdään, että vastetta voidaan kasvattaa parhaiten pienentämällä kulmataajuuksia  $\omega$  ja  $\omega_0$ . Tyypillisillä kaupallisesti saatavilla mikrofoneilla resonanssitaajuus  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  on tyypillisesti 10 – 20 kHz. Jos käytetään mikrofonia, jonka resonanssitaajuus  $f_0 = 20$  kHz, lähellä resonanssitaajuutta, saadaan  $A_x^{opt}(20 \text{ kHz})$ . Jos samanlaisesta kalvosta rakennetaan uusi mikrofoni, jonka resonanssitaajuus  $f_0 = 500$  Hz, niin

$$A_x^{opt}(500 \text{ Hz}) = \left( \frac{20 \text{ kHz}}{0,5 \text{ kHz}} \right)^3 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}) = 40^3 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}) = 64000 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}), \quad (15)$$

15 jos mikrofonit on optimoitu yhtälön (12) mukaisesti. Jos edelleen käytettäisiin taajuudelle 500 Hz optimoitua mikrofonia 50 Hz:n taajuudella, vaste kasvaisi edelleen kymmenkertaiseksi ja parannuskerroin olisi siis 640000. Resonanssitaajuutta voidaan alla olevan yhtälön (16) perusteella pienentää ohentamalla ovea tai kalvoa. Tällöin saadaan lisää parannusta suhteessa  $d_1/d_2$  tilanteissa, joissa oven tai kalvon ohentaminen on teknisesti mahdollista.

20

Resonanssikulmataajuudet riippuvat oven tai kalvon dimensioista ja materiaalista. Ovelle

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2E}{3\rho}} \frac{d}{L^2}, \quad A = Lh, \quad (16)$$

25 jossa  $E$  on materiaalin Youngin moduli,  $\rho$  tiheys,  $L$  oven leveys,  $h$  korkeus ja  $d$  paksuus.

Ympyränmuotoiselle metallikalvolle, jossa ei ole jännitystä

30

$${}_E \omega_0 = \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \frac{4d}{r^2}, \quad (17)$$

jossa  $\sigma$  = Poissonin suhde ja  $r$  kalvon säde.

Jännitetylle ohuelle kalvolle (esimerkiksi Mylar)

5

$$\tau \omega_0 = \frac{2.4\sqrt{T/\mu}}{r} = \frac{2.4}{r} \sqrt{\frac{F}{2\pi\rho d}}, \quad (18)$$

jossa  $T$  on kalvon jännitys ja  $\mu$  massa/yksikköala eli ts.  $\mu = m/a = \rho d A / A = \rho d$ .

10 Tarkkaan ottaen ohuellekin kalvolle (Mylar  $2 \mu\text{m}$ ) on

$$\omega_{\text{tod}}^2 = {}_E \omega_0^2 + {}_\tau \omega_0^2, \quad (19)$$

jossa kuitenkin  ${}_E \omega_0^2 \ll {}_\tau \omega_0^2$ .

15 Jos verrataan samasta materiaalista (piistä) valmistettua esillä olevan keksinnön erään edullisen suoritusesimerkin mukaista ovea, jonka korkeus on  $L/s$ , ympyrämuotoiseen kalvoon, jossa ei ole jännitystä, saadaan

20

$$\frac{A_{\text{ovi}}^{\text{opt}}}{A_{\text{kalvo}}^{\text{opt}}} \approx s\pi \left[ \frac{8}{s\pi(1-\sigma^2)} \right]^{1/3} \approx 20, \quad (20)$$

jos  $s = 10$  eli oven korkeus on kymmenesosa leveydestä  $L$ .

Verrattaessa esillä olevan keksinnön erään edullisen suoritusesimerkin mukaista ovea jännitettyyn Mylar-kalvoon, jota tyypillisesti käytetään tunnetun tekniikan mukaisissa mikrofoneissa, saadaan

25

$$\frac{A_{\text{ovi}}^{\text{opt}}}{A_{\text{Mylar}}^{\text{opt}}} \approx 43 \left( \frac{F}{N} \right)^{2/5}, \quad (21)$$

jossa  $F$  on kokonaisjännittävä voima Newtonina ja  $s = 10$ . Suhde on tyypillisesti 10 – 20 riippuen siitä, kuinka pienellä voimalla  $F$  kalvo on saatu toimivaksi.

30

Esillä olevan keksinnön mukainen ovi on siis ratkaisu, joka antaa vähintään yhden kertaluvun paranemisen anturin vasteessa. Jos tämä parannus lisätään kulmataajuiden antamaan parannukseen, voidaan matalaresonanssisella ovella saada aikaan erittäin edullisesti muutaman miljoonan parannus anturin vasteeseen.

5

Esillä olevan keksinnön erään sovellutusmuodon mukaista ovi-anturia käyttäen on oven ja seinämän välinen rako saatava edullisesti mahdollisimman kapeaksi. Kammiomuoto vuotaa raosta, mistä seuraa, että anturilla on alarajataajuus  $f_{cut}$ , jonka määrää oven raon pinta-ala  $a$  seuraavasti:

10

$$f_{cut} \propto v_0 \frac{a}{V_0}, \quad (22)$$

jossa  $v_0$  on äänennopeus kammiossa ja  $V \gg V_0$ .

15

Toisaalta on edullista, että kammioden välillä on pieni reikä, joka tasaa hitaat painevaihtelut kammioden välillä, ja joka reikä voidaan siis toteuttaa edellä mainittuna rakona oven ja oven karmin välissä.

20

Verrattaessa optista viisaria ja interferometriä toisiinsa, voidaan todeta, että yhtälö (33) ei toteudu käytännössä, koska neliön muotoinen (suorakulmainen) ovi ei ole optimaalinen muoto optimoitaessa yhtälöä (10). Eli toisin sanoen esillä olevan keksinnön mukainen optinen viisari ja interferometri toimivat erittäin hyvin myös neliön muotoisella (suorakulmaisella) ovella, mutta jos herkkyyttä ja tarkkuutta halutaan edelleen parantaa, tulee oven muotoa muuttaa. Käytettäessä ovea, jonka korkeus on kymmenesosa leveydestä  $L$  (eli  $s = 10$ ), yhtälö (31) antaa kuviossa 11 esitetyn mukaisesti

25

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3L\lambda}{16L/10(S/N)} \approx \frac{2\lambda}{S/N}, \quad (49)$$

joka on 16-kertainen vastaavaan interferometrin arvoon verrattuna (yht. (45)). Edelleen interferometri paranee optiseen viisariin verrattuna, jos  $s$  kasvaa eli ovi madaltuu, mikä toisaalta lisää myös oven liikkeen amplitudia  $A_x(\omega)$ .

5 Oven muotoa voidaan parantaa lisää esimerkiksi pienentämällä edelleen resonanssitaajuutta heikentämällä oven saranaa saranan keskiosaa urittamalla, kuten kuviossa 12a on esitetty ja/tai lisäämällä oven pinta-alaa oven päässä, kuten kuviossa 12b on esitetty. Kuviossa 12b esitetty oven malli soveltuu erityisen hyvin interferometrin kertojaratkaisuun, joka on tarkemmin esitetty alla.

10

Koska käytettäessä interferometriä ovesa on lähes pistemäinen lasertäplä, voidaan interferometrissä soveltaa monikertaista heijastusta, eli kertojaa, kuviossa 13 esitetyn mukaisesti. Laservalo menee päätypeiliin 21 heijastuen  $n$  -kertaa ovesta ja oven läheisyyteen järjestetystä kiinteästä tasopeilistä 20, joka on edullisesti järjestetty samansuuntaiseksi ovipinnan kanssa. Laserin fokus on lähellä päätypeiliä, josta lasersäde tulee takaisin samaa reittiä heijastuen toiset  $n$  -kertaa ovesta. Jos ovi liikah-  
 15 taa matkan  $\Delta x$ , optinen matka muuttuu interferometrissä  $4n\Delta x$  verran ja vaste kasvaa  $2n$  -kertaiseksi, jos ei ole heijastustappioita.

20

Jos peilien ja oven heijastuskerroin on  $R$ , niin yhtälö (45) saa nyt uuden muodon:

$$R x_{\min} = \frac{\lambda}{2nR^{4n-2}8(S/N)} = \frac{x_{\min}}{2nR^{4n-2}}. \quad (50)$$

25

Tällä menetelmällä saadaan noin 10-kertainen herkkyyden lisäys. Moninkertaista heijastusta voidaan soveltaa myöskin esillä olevan keksinnön mukaisessa translaatiomittauksen laserheijastuksessa, koska laser on fokuksessa ovesa.

30

Verrattaessa esillä olevan keksinnön mukaista optista viisaria ja interferometriä toisiinsa, voidaan todeta, että molemmilla esillä olevan keksinnön mukaisilla mittausjärjestelyillä saavutetaan olennainen parannus mittauksen tarkkuuteen ja herkkyy-

teen. Interferometrinen mittaus on vielä jonkin verran tarkempi kuin optinen viisari, mutta samalla mittausjärjestely on hivenen monimutkaisempi. Näin ollen tulee sovellus- ja tapauskohtaisesti harkita tarvittava herkkyys ja valita käytettävä mittausmenetelmä.

5

Kuten edellä todettiin, on tunnettujen fotodetektoreiden ongelmana niiden häiriintyminen ulkoisista äänistä. Esillä olevan keksinnön mukaisesti ulkoisten äänten vaikutusta voidaan vähentää sinänsä tunnetulla kaksoisdetektorilla, joka on esitetty kuviossa 1. Esillä olevan keksinnön mukaisesti varsinainen mittaussignaali- ja referenssisignaali mitataan erikseen ja lasketaan niiden amplitudit, joiden erotus antaa tarkemman ja paremman suodatuksen ulkoisista häiriöäänistä. Erityisesti taajuusalueella, jossa ei ole kaasun aiheuttamaa signaalia, saadaan häiriöääntä oleellisesti vähennettyä. Kuvatus kaltainen häiriöiden poistomenetelmä soveltuu myös muihin kuin edellä esitettyyn fotoakustiseen detektoriin. Näin ollen esillä olevan keksinnön mukaisella häiriöiden poistomenetelmällä voidaan parantaa myös esimerkiksi perinteisten mikrofoniin käyttöön perustuvien fotoakustisten detektorien toimintaa.

10

15

20

Keksintöä ei ole pyritty mitenkään rajoittamaan vain edellisessä selityksessä esitettyyn suoritusmuotoon, vaan sitä voidaan vaihdella patenttivaatimusten esittämän keksinnöllisen ajatuksen puitteissa. Näin ollen esimerkiksi edellä esitetyissä esimerkeissä käytetyt kaksois- ja kolmoisdetektorit voidaan korvata CCD-rividetektorilla tai jollakin muulla useita detektoreita käsittävällä monidetektorilla, koska esimerkeissä esitettyjen detektoreiden eli erillisten mittaussignaalien lukumäärä esittää ainoastaan vähintään tarvittavien mittaussignaalien määrää.

25



**Kirjallisuusviitteet:**

[1] Nicolas Ledermann et. al., Integrated Ferroelectrics, Vol. 35, pp. 177-184 (2001)

[2] M.H. de Paula et. al., J. Appl. Phys., Vol. 64, 3722-3724 (1988)

5 [3] M.H. de Paula et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 63, 3487-3491 (1992)

**Patenttivaatimukset:**

1. Fotoakustinen detektori, joka käsittää ainakin
  - ensimmäisen kammion ( $V_0$ ), johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa,
  - 5 - ikkunan moduloidun ja/tai pulssitetun infrapunasäteilyn ja/tai valon päästämiseksi ensimmäiseen kammioon ( $V_0$ ),
  - toisen kammion ( $V$ ), joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus  $V$ , ja joka on yhteydessä ensimmäiseen kammioon ensimmäisen kammion seinämään järjestetyn aukon kautta,
  - 10 - ainakin yhden anturin, joka on järjestetty ensimmäisen kammion seinämässä olevaan aukkoon ja järjestetty absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden seurauksesta liikkuvaksi, ja
  - välineet anturin liikkeen mittaamiseksi, **tunnettu** siitä, että välineet anturin liikkeen mittaamiseksi käsittävät ainakin yhden tai useamman valolähteen anturin tai
  - 15 sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman monidetektori detektorin anturista heijastuneen valon vastaanottamiseksi ja anturin liikkeen mittaamiseksi optisena kulma- ja/tai translaatiomittauksena.
2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että valonlähde on laser tai hehkulanka.
- 20 3. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että valonlähteen lähettämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain anturin pinnalle.
- 25 4. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että valolähteen lähettämän valonsäteen fokus on järjestetty likimain kaksoisdetektorille.
5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että välineet anturin liikkeen mittaamiseksi käsittävät ainakin valolähteenä toimivan laserin tai hehkulangan, ainakin yhden optisen linssin lasersäteen kohdistamiseksi, refe-
- 30

renssipeilin, säteenjakajan lasersäteen jakamiseksi anturille ja referenssipeilille ja detektorina toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien lasersäteiden vastaanottamiseksi.

- 5 6. Patenttivaatimuksen 5 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että referenssipeili on järjestetty siten, että kolmois- tai rividetektorille syntyy  $\frac{3}{4}$  osaa interferenssijuovasta.

- 10 7. Patenttivaatimuksen 5 tai 6 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että välineet anturin liikkeen mittaamiseksi käsittävät lisäksi kiinteän tasopeilin ja kiinteän päätypeilin, jotka on järjestetty siten, että laservalo kulkee päätypeiliin ja takaisin heijastuen edestakaisin anturin ja tasopeilin välillä.

- 15 8. Patenttivaatimuksen 7 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että tasopeili ja/tai päätypeili on järjestetty siten, että säteenjakajalta anturin kautta päätypeilille kulkevaksi järjestetty lasersäde palaa samaa optista tietä takaisin päätypeililtä säteenjakajalle.

- 20 9. Jonkin edellä mainitun patenttivaatimuksen mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että se käsittää lisäksi kolmannen kammion, joka on suljettu ja kooltaan identtinen ensimmäisen kammion kanssa, ja jossa on ensimmäisen kammion käsittämän aukon kanssa identtinen aukko, joka yhdistää kolmannen kammion toiseen kammioon, ja joka kolmannen kammion aukko on suljettu vastaavalla anturilla kuin ensimmäisen kammion aukko, ja jonka anturin liikettä mitataan vastaavalla tavalla kuin ensimmäisen kammion aukon sulkevan aukon liikettä, sekä välineet ensimmäisen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun varsinaisen mittaus-
- 25 signaalin ja kolmannen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun referenssisignaalin amplitudien laskemiseksi ja niiden erotuksen aikaansaamiseksi.

10. Mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi, **tunnettu** siitä, että se käsittää ainakin valolähteenä toimivan laserin tai hehkulangan, ainakin yhden optisen linssin valonsäteen kohdistamiseksi, referenssipeilin, säteenjakajan valonsäteen jakamiseksi anturille ja referenssipeilille, kiinteän tasopeilin ja kiinteän päätypeilin, jotka on järjestetty siten, että valonsäde kulkee päätypeiliin ja takaisin heijastuen edestakaisin anturin ja tasopeilin välillä, ja detektorina toimivan kolmois- tai rividetektorin säteenjakajalta tulevien valonsäteiden vastaanottamiseksi.

- 10 11. Menetelmä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi, **tunnettu** siitä, että mittaus suoritetaan optisena mittauksena, jolloin anturia tai sen osaa valaistetaan ja anturista heijastunutta valoa mitataan monidetektori detektorilla, ja
- anturin liike mitataan kulmamittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain kaksoisdetektorille ja mittaamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksoisdetektorilla tai rividetektorilla, tai
  - anturin liike mitataan translaatiomittauksena kohdistamalla valonsäteen fokus likimain anturin pinnalle ja kaksois- tai rividetektorille ja mittaamalla heijastuneen valonsäteen siirtymää kaksois- tai rividetektorilla tai
  - anturin liike mitataan translaatiomittauksena käyttäen interferometriä, ja mittaamalla anturista heijastuneen valonsäteen interferenssijuovan siirtymistä kolmois- tai rividetektorilla.

12. Menetelmä fotoakustisen detektorin optimoinnissa, **tunnettu** siitä, että paineenvaihteluiden seurauksena liikkuvaksi järjestetyn anturin amplitudin optimointi suoritetaan käyttämällä optimointiyhtälöä:

$$A_x(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}},$$

kun  $\omega < \omega_0$

$$A_x(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}},$$

kun  $\omega > \omega_0$ .

13. Patenttivaatimuksen 12 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että amplitudin  $A_x(\omega)$  optimointi suoritetaan optimoimalla ainakin yhtä seuraavista muuttujista:  $\omega_0$ ,  $A$ ,  $d$  ja  $V_0$ .

## Tiivistelmä

Keksinnön kohteena on fotoakustinen detektori, joka käsittelee ainakin ensimmäisen kammion ( $V_0$ ), johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa, ikkunan moduloidun ja/tai pulssitetun infrapunasäteilyn ja/tai valon päästämiseksi ensimmäiseen kammioon ( $V_0$ ), toisen kammion ( $V$ ), joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus  $V$ , ja joka on yhteydessä ensimmäiseen kammioon ensimmäisen kammion seinämään järjestetyn aukon kautta, ainakin yhden anturin, joka on järjestetty ensimmäisen kammion seinämässä olevaan aukoon ja järjestetty absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden seurauksesta liikkuvaksi, ja välineet anturin liikkeen mittaamiseksi. Välineet anturin liikkeen mittaamiseksi käsittävät ainakin yhden tai useamman valolähteen anturin tai sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman monidetektorin detektorin anturista heijastuneen valon vastaanottamiseksi ja anturin liikkeen mittaamiseksi optisena kulma- ja/tai translaatiomittauksena. Lisäksi keksinnön kohteena on mittausjärjestely fotoakustisessa detektorissa, menetelmä fotoakustisen detektorin anturin liikkeen mittaamiseksi ja menetelmä fotoakustisen detektorin optimoinnissa.

Fig. 1

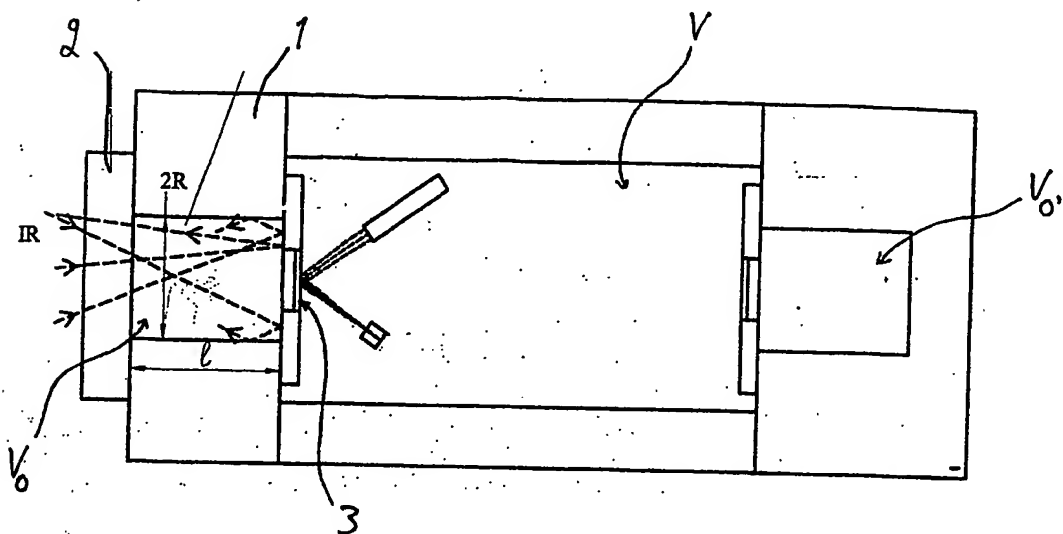


Fig. 1

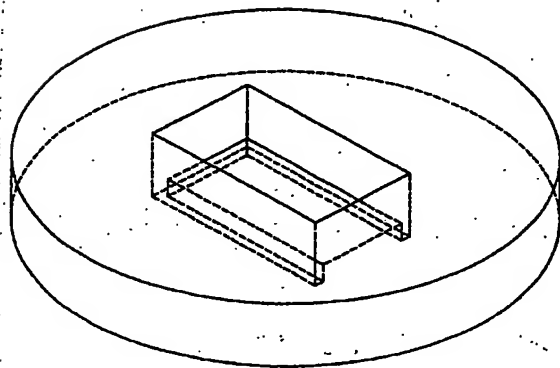


Fig. 8

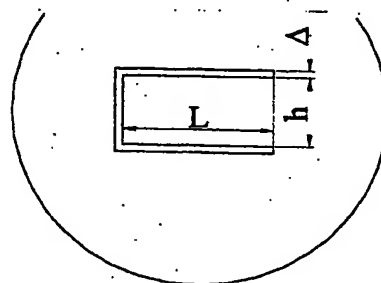


Fig. 9a

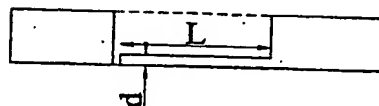


Fig. 9b

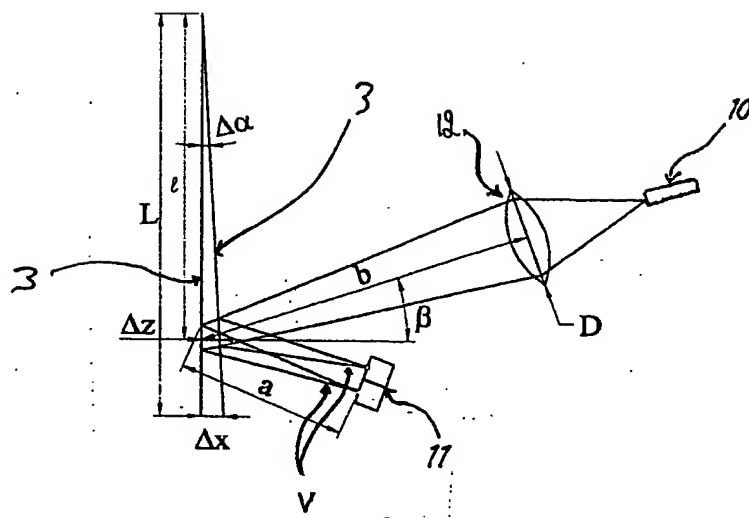


Fig. 2

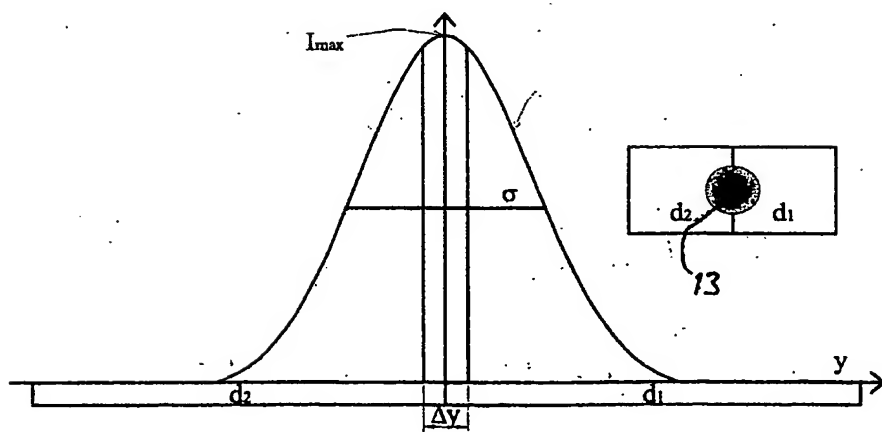


Fig. 3



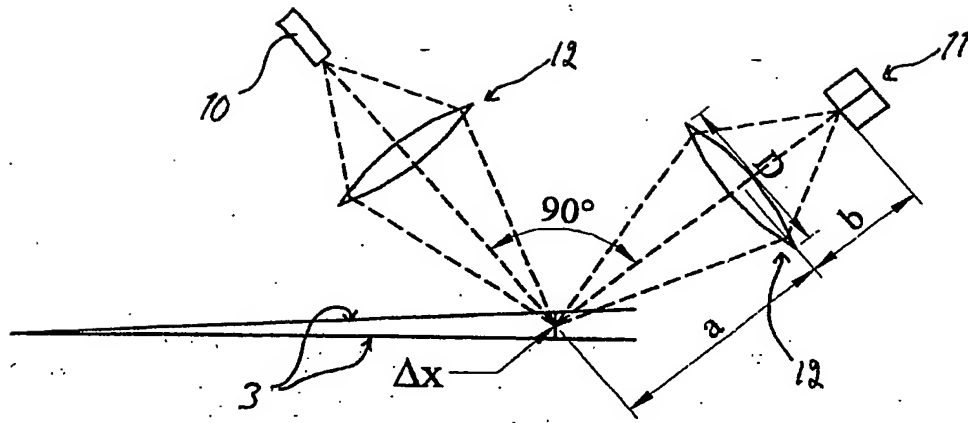


Fig. 4

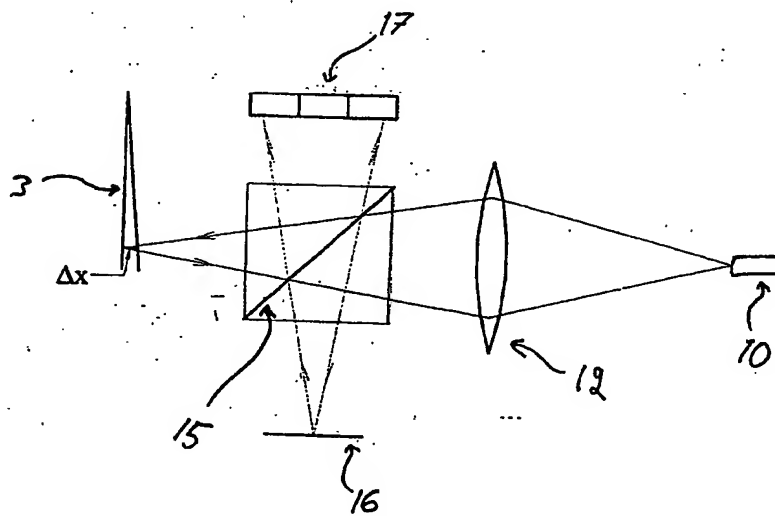


Fig. 5

44

41

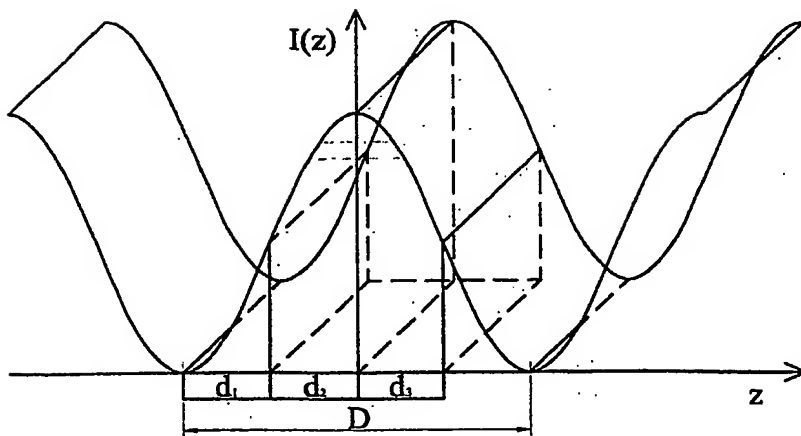


Fig. 6

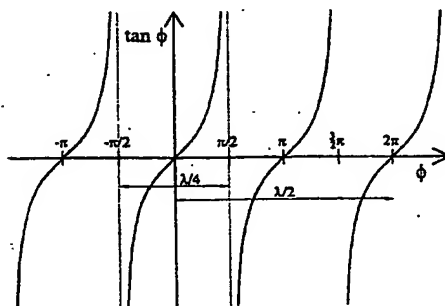


Fig. 7

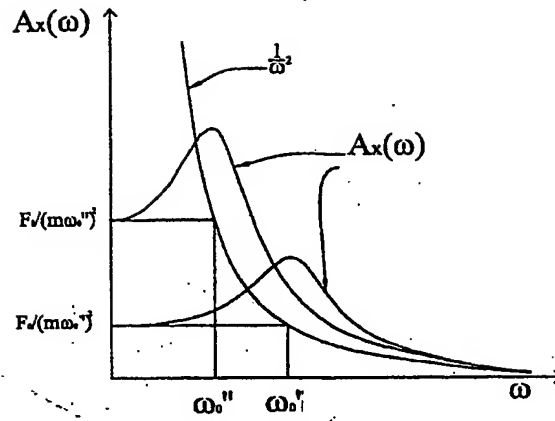


Fig. 10a

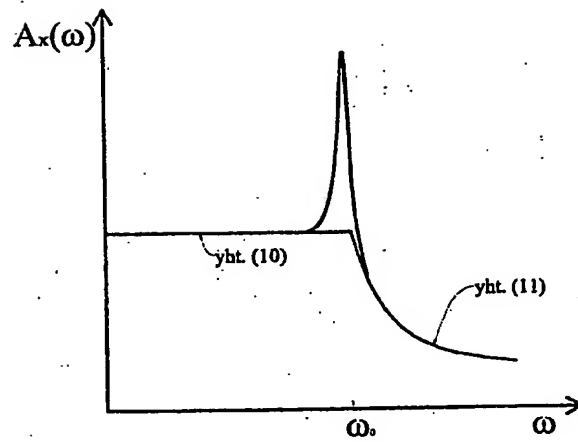


Fig. 10b

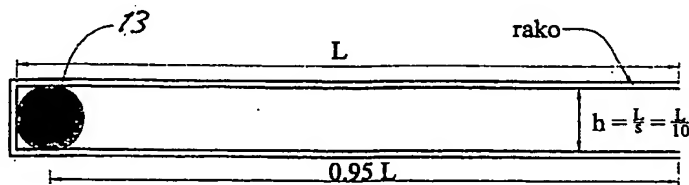


Fig. 71

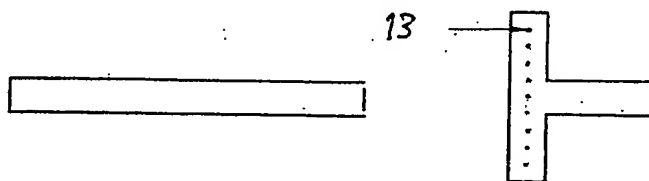


Fig. 12a

Fig. 12b

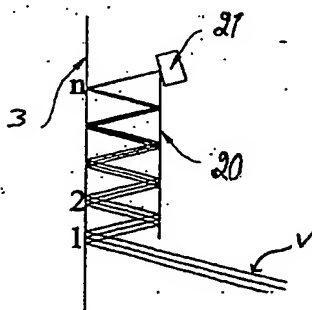


Fig. 13

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**